МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

УДК 621.914.1
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129

Научная статья

Анализ систем автоматизированного обеспечения параметров шероховатости поверхности на основе динамического мониторинга

М. Р. Гимадеев ✉, **А. А. Ли**
Тихоокеанский государственный университет, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136
✉ 009063@pnu.edu.ru, jl_wiegott@list.ru

Аннотация

Введение. Проанализированы отечественные и зарубежные работы о проблемах фрезерования сложнопрофильных поверхностей сфероцилиндрическим концевым инструментом. Рассмотрены методы контроля качества поверхности и пути обеспечения амплитудных параметров шероховатости, которые базируются на данных исследований и натурных экспериментов. Представлены теоретические положения по определению сил резания и результаты виброакустической диагностики.

Материалы и методы. Использовались методы корреляционного анализа, сравнения и обобщения результатов. Расчетные данные находились при различных углах наклона инструмента с учетом мгновенных сил резания и фиксировались в диапазоне значений переменной подачи на зуб (fz) и угла наклона поверхности (γ). Нашли экспериментальное подтверждение сведения виброакустической диагностики и теоретические данные представленной модели при различных углах наклона инструмента. Следовательно, такие методы можно использовать для прогнозирования параметров шероховатости поверхности.

Результаты исследования. Выявлена взаимосвязь между силами резания, углом наклона инструмента и данными виброакустической диагностики. Сформулирована модель силы резания и перемещений инструмента с учетом наклона поверхности. Определен оптимальный диапазон углов наклона инструмента к обрабатываемой поверхности, который обеспечивает минимальные значения амплитудных параметров шероховатости. Полученные эмпирическим путем звуковые колебания, представленные в спектральном и волновом виде, хорошо согласуются с данными из других источников, что позволило сделать вывод о целесообразности прогнозирования и мониторинга параметров шероховатости в реальном времени за счет акустики.

Обсуждение и заключения. Установлено, что рост сил в направлении $a_e(X)$ и $fz(Y)$ наблюдается при $\gamma > 40°$. Это объясняется распределением составляющих силы резания вдоль режущей кромки и зависит от наклона поверхности. Уменьшение амплитудных параметров происходит при увеличении угла от 10 до 40 градусов. Найденные взаимосвязи силового анализа, направления обработки и виброакустической диагностики подтверждают корректность использования виброакустической диагностики для прогнозирования шероховатости поверхности. Акустическая диагностика вне зависимости от компоновки технологического оборудования позволяет быстро наладить звуковое устройство и оценить влияние режимов резания на параметры шероховатости.

Ключевые слова: шероховатость, сфероцилиндрическая фреза, виброакустическая диагностика, фрезерование, наклон инструмента, вибрация, силы резания.

Благодарности: авторы выражают благодарность А. В. Никитенко, к.т.н., доценту кафедры Технологическая информатика и информационные системы (ТОГУ, Хабаровск), за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований в учебно-производственном центре CAD/CAM технологий.

Для цитирования: Гимадеев, М. Р. Анализ систем автоматизированного обеспечения параметров шероховатости поверхности на основе динамического мониторинга / М. Р. Гимадеев, А. А. Ли // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 2. — С. 116–129. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129

Original article

Analysis of automated surface roughness parameter support systems based on dynamic monitoring

Mikhail R. Gimadeev ✉, **Andrey A. Li**
Pacific National University, 136, Tihookeanskaya St., Khabarovsk, Russian Federation
✉ 009063@pnu.edu.ru

Abstract
Introduction. Domestic and foreign works on the milling of complex-profile surfaces with a ball-end tool were analyzed. Methods of surface quality control and ways to provide amplitude parameters of roughness, based on research data and field experiments, were considered. Theoretical provisions on the determination of cutting forces and the results of vibroacoustic diagnostics were presented.

Materials and Methods. The methods of correlation analysis, comparison and generalization of the results were applied. The data were calculated at different tool angles, taking into account the instantaneous cutting forces, and were fixed in the range of values of the variable feed per tooth (*fz*) and the angle of inclination of the surface (γ). The vibroacoustic diagnostic data and theoretical data of the presented model at different tool inclination angles were verified by experiment. Consequently, such methods can be used to predict surface roughness parameters.

Results. The relationship between cutting forces, tool inclination angle, and vibroacoustic diagnostics data was found. A model of the cutting force and tool displacements was formulated taking into account the inclination of the surface. The optimal range of the inclination angle of the tool to the surface to be machined, at which the minimum values of the amplitude parameters of roughness were achieved, was determined. The sound vibrations obtained empirically, presented in spectral and wave forms, were in good agreement with data from other sources. This allowed us to conclude about the feasibility of forecasting and monitoring roughness parameters in real time through acoustics.

Discussion and Conclusions. It was established that the growth of forces in the direction $a_e(X)$ and $fz(Y)$ was observed at $\gamma > 40°$. This was due to the distribution of the components of the cutting force along the cutting edge and depended on the inclination of the surface. The amplitude parameters decreased when the angle increased from 10 to 40 degrees. The found interrelations of force analysis, processing directions, and vibroacoustic diagnostics have validated the use of vibroacoustic diagnostics to predict surface roughness. Acoustic diagnostics, regardless of the layout of technological equipment, enables to quickly adjust the sound device and assess the impact of cutting modes on roughness parameters.

Keywords: surface roughness, ball-end tool, vibroacoustic diagnostics, milling, tool inclination, vibration, cutting forces.

Funding information: the authors would like to thank A.V. Nikitenko, Cand.Sci. (Eng.), associate professor of the Department of Technical Informatics and Information Systems (PNU, Khabarovsk), for assistance with organizing and conducting experimental research at the CAD/CAM Technologies Training and Production Center.

For citation: M. R. Gimadeev, A. A. Li. Analysis of automated surface roughness parameter support systems based on dynamic monitoring. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 116–129. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129

Введение. Специалистам недостаточно программных инструментов, которые помогли бы предсказать значение силы резания, амплитуды вибраций и т. п. при программировании станков с числовым программным управлением (ЧПУ). В результате приходится подбирать скорость подачи на основе опыта, устанавливая постоянную скорость подачи для всей обрабатываемой поверхности сложной формы. Это может снизить эффективность обработки и качество поверхностей. Для решения данной проблемы необходимо построить высокоточную и надежную модель прогнозирования шероховатости поверхности.

В настоящее время при таком прогнозировании используют два основных подхода. В первом случае фотоэлектрические датчики транслируют данные о шероховатости онлайн. Эффективность этого способа достаточно низкая т. к. в процессе резания образуется стружка, а в область регистрируемого микрорельефа подается смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ). Ко второй группе можно отнести методы контроля с

применением искусственного интеллекта, а также теоретическое моделирование и моделирование эмпирического регрессионного анализа. В практике наиболее распространены методы из второй группы.

Авторы работы [1] исследовали фрезерование сфероцилиндрическим инструментом аэрокосмических компонентов из алюминиевого сплава LM6 и разработали модель с использованием структур ARMAX (англ. autoregressive moving average with exogenous inputs — авторегрессионная скользящая средняя с экзогенными входными данными) для прогнозирования шероховатости поверхности при различных режимах обработки. В [2] представлена математическая модель траектории движения сфероцилиндрического инструмента для обработки грибовидных лопаток паровой турбины с целью повышения эффективности обработки и качества поверхности. Авторы [3] создали аналитическую модель процесса фрезерования сфероцилиндрическим инструментом и рассмотрели ситуацию возникновения вибрации для прогнозирования пределов устойчивости инструмента при разных углах наклона и скорости вращения шпинделя. В [4] исследуется обработка крыльчатки на пятиосевом станке с ЧПУ при использовании сфероцилиндрического инструмента. Траекторию движения инструмента и оптимальные режимы резания пришлось разрабатывать из-за сложной криволинейной поверхности и близкого расположения лопастей колеса, так как в этом случае невозможно задействовать стандартные системы CAM (англ. computer-aided manufacturing — автоматизированная система или ее модуль для подготовки управляющих производственных программ). В [5] описана система оптимизации скорости подачи для трехосевого фрезерования сфероцилиндрическим инструментом. Использовали возможности геометрического моделирования B-rep ACIS: резание под углом преобразовали в ортогональную модель для различных инструментов и заготовок. Авторы [6] создали математическую модель постоянной силы резания [7] для обработки сложной криволинейной поверхности сфероцилиндрическим инструментом на станке с ЧПУ за счет поддержания постоянной скорости резания при различных углах наклона инструмента. В [8] представлена динамическая модель процесса фрезерования сфероцилиндрическим инструментом, включающая режимы резания и износ кромки инструмента. Авторы [9] разработали систему мониторинга в реальном времени с компенсацией погрешностей для повышения точности при производстве деталей свободной формы. В [10] исследуется энергопотребление при различных стратегиях резания с целью оценки эффективности каждой стратегии резания. Авторы этой работы установили, что оптимальная стратегия позволяет обеспечить заданные параметры качества поверхности.

Многие ученые использовали метод Тагути (Тагучи) для оптимизации параметров обработки [11–13]. Некоторые изыскания носят узконаправленный характер и для масштабирования результатов необходима дополнительная работа [14–18].

Анализ литературных источников выявил отсутствие рекомендаций по использованию метода прогнозирования и мониторинга шероховатости в реальном времени. Это тем более касается случаев, когда учитываются звуковые колебания в воздушной среде.

Материалы и методы. Для определения сил резания применяется модель из [7, 19]:

$$\begin{aligned} dF_{tj} &= K_{te} dl_j + K_{tc} dS_{zj}, \\ dF_{rj} &= K_{re} dl_j + K_{rc} dS_{zj}, \\ dF_{aj} &= K_{ae} dl_j + K_{ac} dS_{zj}. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь K_{te}, K_{re}, K_{ae} — краевые удельные коэффициенты, K_{tc}, K_{rc}, K_{ac} — удельные коэффициенты сдвига, dl_j — бесконечно малая длина режущей кромки l_j [20], S_{zj} — площадь поперечного сечения срезаемого сегмента.

В этой модели для задания результирующей силы, действующей на i-й бесконечно малый отрезок режущей кромки, используется множество криволинейных систем координат, перпендикулярных касательным к сферической поверхности.

Геометрия сфероцилиндрической концевой фрезы схематично показана на рис. 1.

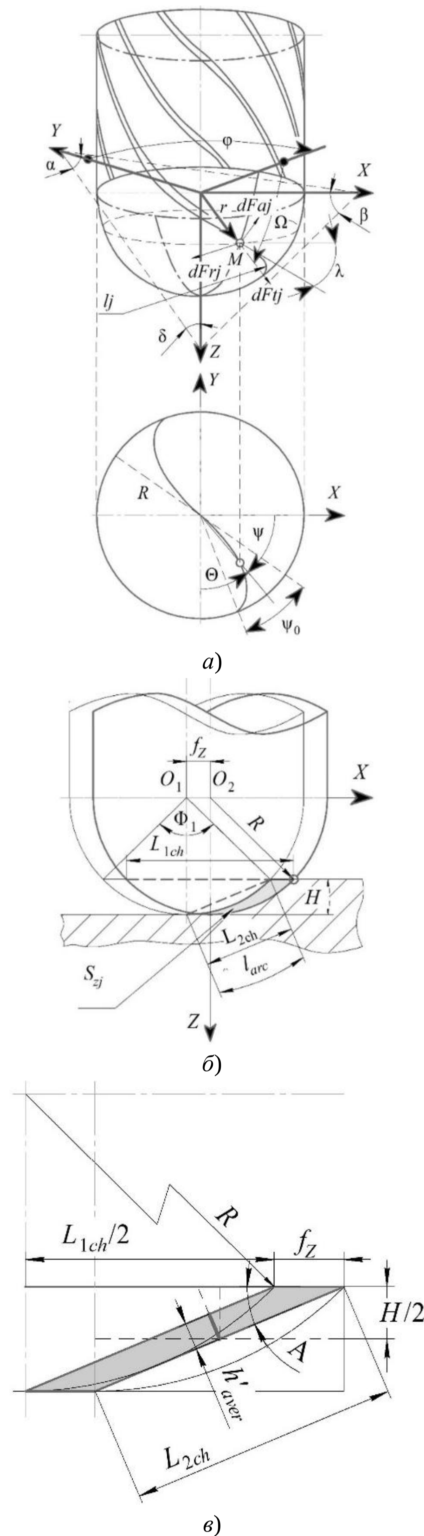

Рис. 1. Схема для определения: *а* — сил резания сфероцилиндрической фрезы;
б — срезаемого сегмента; *в* — площади поперечного сечения приведенной фигуры [16].

На схеме указаны угол наклона λ фрезы со сфероцилиндрической исходной поверхностью инструмента вдоль режущей кромки. Здесь же видим:

– тангенсальную dF_{tj}, радиальную dF_{rj}, осевую dF_{aj} силы резания, действующие на *j*-й зуб, и координаты инструмента для сфероцилиндрической концевой фрезы (рис. 1 *а*);

– хорду L_{2ch}, угол сегмента Φ_1, длину дуги l_{arc} (рис. 1 *б*);

– площадь поперечного сечения (рис. 1 *б*, *в*).

$$S_{zj} = L_{2ch} \cdot h'_{aver}, \qquad (2)$$

где L_{2ch} — длина второй хорды, мм; h'_{aver} — средняя толщина стружки, мм.

$$L_{2ch} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{H}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_{1ch}}{4}\right)^2}, \quad (3)$$

$$h'_{aver} = fz \cdot \sin A. \quad (4)$$

Длина первой хорды L_{1ch}, длина дуги l_{arc} и угол сегмента круга Φ_1:

$$L_{1ch} = 2 \cdot \sin \cdot \frac{l_{arc}}{2R} \cdot R, \quad (5)$$

$$l_{arc} = \frac{\Phi_1 \cdot R}{2}, \quad (6)$$

$$\Phi_1 = 2\arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{H}{2R}\right). \quad (7)$$

Угол А (рис. 1 *в*) для расчета средней толщины стружки:

$$A = \arctan\left(\frac{H}{L_{1ch} / 2}\right). \quad (8)$$

Радиус-вектор r текущей точки исходной инструментальной поверхности:

$$r = \begin{bmatrix} R\sin\varphi \cos\Omega \\ R\sin\varphi \sin\Omega \\ R\cos\varphi \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Уравнение режущей кромки решается как уравнение кривой, расположенной на исходной инструментальной поверхности и пересекающей меридианы под углом λ 90°. Параметрическое уравнение вида Ω = Ω (φ) описывает некоторую линию на сфере. Косинусы углов между осями системы координат *XYZ* сфероцилиндрической фрезы и касательной прямой к кривой Ω = Ω (φ) на исходной инструментальной поверхности:

$$\cos\alpha = \frac{dX}{dS} = \frac{\cos\varphi \cos\Omega\, d\varphi - \sin\varphi \sin\Omega\, d\varphi}{\sqrt{d\varphi^2 + \sin^2\varphi\, d\Omega^2}},$$
$$\cos\beta = \frac{dY}{dS} = \frac{\cos\varphi \sin\Omega\, d\varphi - \sin\varphi \cos\Omega\, d\varphi}{\sqrt{d\varphi^2 + \sin^2\varphi\, d\Omega^2}}, \quad (10)$$
$$\cos\delta = \frac{dZ}{dS} = \frac{-\sin\varphi\, d\varphi}{\sqrt{d\varphi^2 + \sin^2\varphi\, d\Omega^2}},$$

где dS — дифференциал дуги режущей кромки.

Косинусы углов между осями координат и касательной прямой к меридиану (при Ω = const) на исходной инструментальной поверхности представляются в виде зависимостей С. П. Радзевича [21]:

$$\cos\alpha = \frac{dX}{dS} = \cos\varphi \cos\Omega,$$
$$\cos\beta = \frac{dY}{dS} = \cos\varphi \sin\Omega, \quad (11)$$
$$\cos\delta = \frac{dZ}{dS} = -\sin\varphi.$$

Поставим условие: Ω = λ. Тогда уравнения режущей кромки в параметрической форме:

$$X = \frac{R\cos\lambda}{chq\,(\lambda + C)},$$
$$Y = \frac{R\sin\lambda}{chq\,(\lambda + C)}, \quad (12)$$
$$Z = Rthq\,(\lambda + C),$$

где ch — гиперболический косинус, th — гиперболический тангенс.

Для определения бесконечно малой длины режущей кромки можно воспользоваться выражением, предложенным в [7, 16, 19]:

$$dl = \sqrt{r^2(\psi) + \left(r'(\psi)^2\right) + \left(z'(\psi)^2\right)}\, d\psi, \tag{13}$$

где

$$\left.\begin{aligned} r(\psi) &= \sqrt{1 - (\psi \cot \lambda - 1)^2} \\ r'(\psi) &= \frac{-R(\psi \cot \lambda - 1)\cot\lambda}{\sqrt{1 - (\psi \cot \lambda - 1)^2}} \\ z'(\psi) &= X^2 + Y^2 + (R - Z)^2 \cot^2\lambda \end{aligned}\right\}. \tag{14}$$

Основная часть

Детали эксперимента. На подготовительном этапе изучена литература [22–27]. Данные при планировании эксперимента описаны ниже. Механообработка проводилась в попутном и встречном направлениях (рис. 2), на заготовках со свойствами стали 45 (зарубежные аналоги — С45, 1045). Использовали сфероцилиндрическую концевую твердосплавную фрезу диаметром D = 8 мм, с двумя зубьями фирмы Sandvik Coromant (z = 2). Соотношение вылета инструмента, установленного в патроне, приняли как l / D, равным 4. Фрезерный инструмент из мелкозернистого карбида вольфрама имел противоизносное покрытие TiAlN и параметр λ = 30°. Подача на зуб fz = 0,2 мм/зуб, величина припуска для всех образцов $a_p = H$ = 0,2 мм, боковой шаг a_e = 0,2 мм. Для обеспечения равной скорости резания V_c при различных углах наклона (γ) инструмента к обрабатываемой поверхности частота вращения (n) варьировалась в диапазоне от 1478 min^{-1} до 8000 min^{-1}.

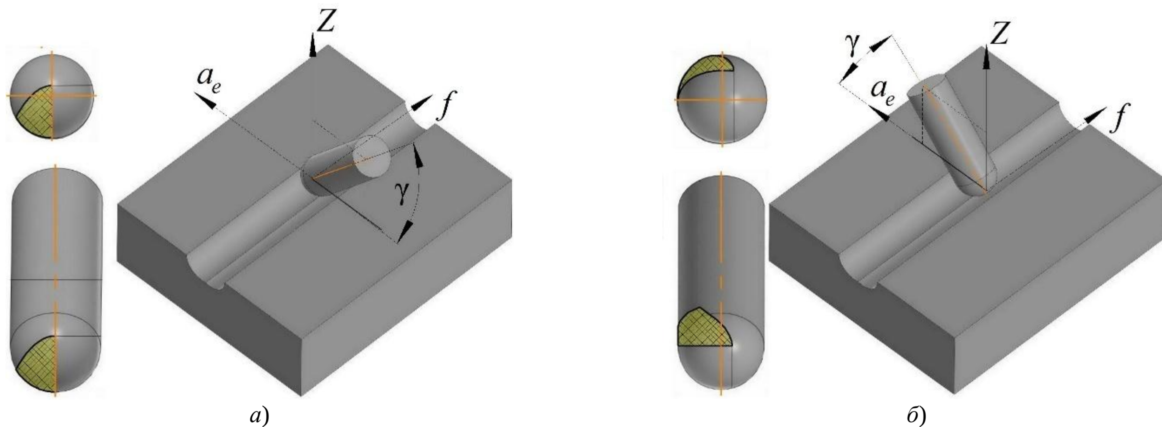

Рис. 2. Виды условной поверхности контакта заготовки и инструмента при различных значениях углов наклона инструмента в направлении: *а* — попутном; *б* — встречном

Угол γ выбирался из диапазона от 10° до 50°, поэтому расчет эффективного диаметра D_{cap} (L_{1ch}) проводился по формулам:

$$\gamma > 0° \begin{cases} D_{cap} = 2D\cos\omega = 2 \cdot R \cdot \cos(90° - \gamma) \\ \text{или} \\ D_{cap} = L_{1ch} = 2 \cdot \sin \cdot \dfrac{l_{arc}}{2R} \cdot R. \end{cases} \tag{15}$$

В экспериментах использовали станок с ЧПУ DMG DMU 50 (управляющая система Heidenhain). Шероховатость поверхности после обработки измеряли при помощи профилометра-профилографа-контурографа Surfcom 1800D. В соответствии с действующими стандартами[1] проводили измерения по различным трассам. Для нахождения максимальных значений параметров шероховатости поверхности использовали 50 % Гауссовой фильтрации. Виброакустическая диагностика выполнялась согласно ГОСТ Р ИСО 7919-3-99[2] с применением анализатора спектра ZetLab 017-U2. В качестве выходной оценки эффективности обработки использовали амплитуду A вибраций шпиндельного узла (мм), изменяющуюся со временем (t, с).

[1] ГОСТ 27964-88. Измерение параметров шероховатости. Термины и определения. М., 2018. 13 с.
[2] ГОСТ Р ИСО 7919-3-99. Контроль состояния машин по результатам измерений вибраций на вращающихся валах. М., 2000. 12 с.

Результаты исследования. Эксперимент показал, что реальная шероховатость поверхности существенно отличается от данных теоретических моделей — результатов кинематико-геометрической проекции инструмента на заготовку. В настоящее время растут востребованность в деталях пространственно-сложной конфигурации и запросы к качеству поверхности. В этой связи стоит сфокусироваться на требованиях предсказуемости результатов механической обработки, выраженных в том числе показателями шероховатости.

В таблице 1 и 2 представлены результаты эксперимента амплитудных параметров шероховатости, описанных в ГОСТ Р ИСО 4288[3].

Таблица 1

Параметры шероховатости в зависимости от направления обработки сфероцилиндрическим инструментом при попутном фрезеровании

	Амплитудные параметры шероховатости, µm					
Угол, °	*Ra*	*Rq*	*Rz*	*Rt*	*Rp*	*Rv*
10	0,457	0,569	2,912	5,000	1,671	1,240
20	0,597	0,735	3,936	5,159	2,335	1,600
30	0,449	0,561	3,007	4,960	1,808	1,200
40	0,479	0,590	3,232	4,239	1,823	1,407
50	0,787	1,027	6,615	12,68	4,119	2,496

Таблица 2

Параметры шероховатости в зависимости от направления обработки сфероцилиндрическим инструментом при встречном фрезеровании

	Амплитудные параметры шероховатости, µm					
Угол, °	*Ra*	*Rq*	*Rz*	*Rt*	*Rp*	*Rv*
10	0,806	1,006	4,776	5,960	2,776	2,000
20	0,752	0,935	5,207	6,440	2,847	2,359
30	0,509	0,647	3,727	5,239	2,223	1,503
40	0,628	0,805	4,832	7,400	2,912	1,919
50	0,730	0,915	5,111	7,639	3,039	2,072

Анализируя данные таблиц 1 и 2, отметим, что превалирующее влияние на «высоту» шероховатости оказывает направление резания. Количественное значение амплитудных параметров «ниже» при попутном фрезеровании. Далее будем говорить только о таком фрезеровании.

На основании данных таблицы 1 провели корреляционный анализ и составили коррелограмму (рис. 3). Выявленные зависимости соотносимы с результатами работ [28, 29].

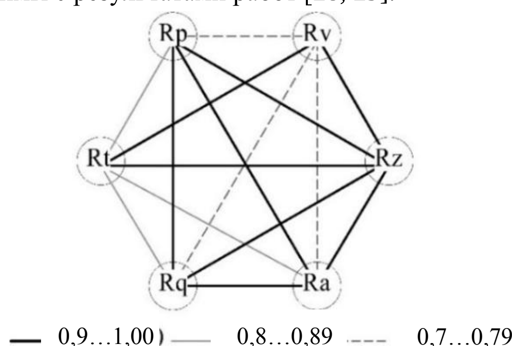

Рис. 3. Коррелограмма амплитудных параметров шероховатости после фрезерования в попутном направлении

Уравнения, полученные в ходе корреляционного анализа, помогают отойти от прямого нормирования параметров шероховатости. При этом аналитические зависимости способствуют минимизации числа контролируемых факторов. Это снижает трудоемкость перехода к мониторингу звуковых колебаний в реальном времени.

[3] ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. М., 2015. 20 с.

В представленном исследовании рассчитаны силы резания (Fx, Fy, Fz) (рис. 4). Видно, что угол наклона поверхности γ существенно влияет на силы резания.

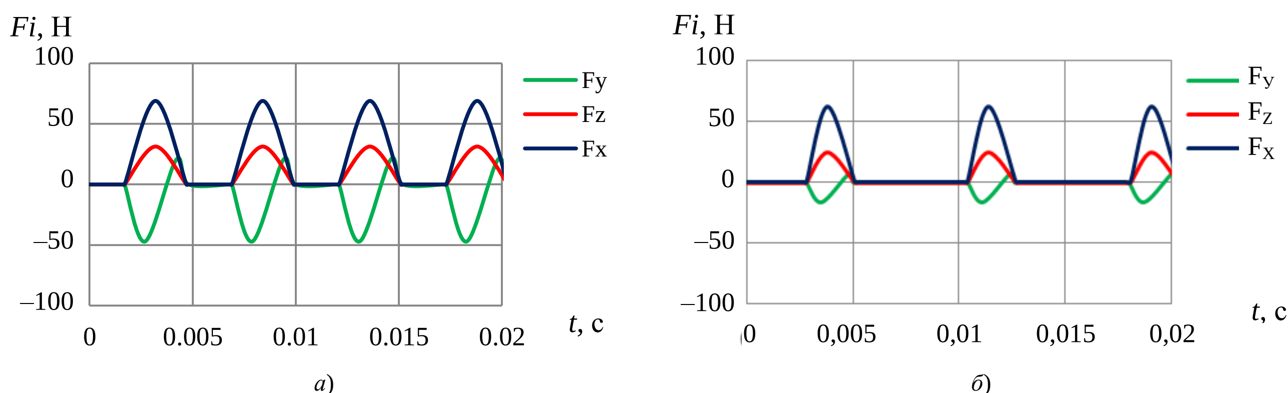

Рис. 4. Силы резания, рассчитанные для: *а* — γ = 10; *б* — γ = 40°

Полученные данные позволили установить, что силы уменьшаются с увеличением угла наклона инструмента от 10° до 40°. Кроме того, сила Fx наиболее чувствительна при изменении угла наклона поверхности. Отметим также, что силы резания, рассчитанные по вышеупомянутой методике, хорошо согласуются с полученными эмпирическими результатами работ [6, 17, 24, 26, 27, 30] .

С ростом угла γ уменьшается предельная площадь погружения инструмента в заготовку (определяемая рабочим углом и активным числом зубьев z_c). Следовательно, при чистовом фрезеровании сфероцилиндрическим инструментом могут присутствовать «пульсирующие» силы, поскольку для угла наклона поверхности γ > 0° число активных зубьев часто меньше единицы ($z_c < 1$).

Чтобы установить z_c, проанализировали звуковые колебания в ходе резания. Авторы работы [31] предложили разделить спектр колебаний рабочих органов на диапазоны:

– 20…300 Гц — низкочастотный,

– 300…1500 Гц — среднечастотный,

– 1500 Гц и более — высокочастотный.

Экспериментально полученный диапазон звуковых колебаний представлен на рис. 5.

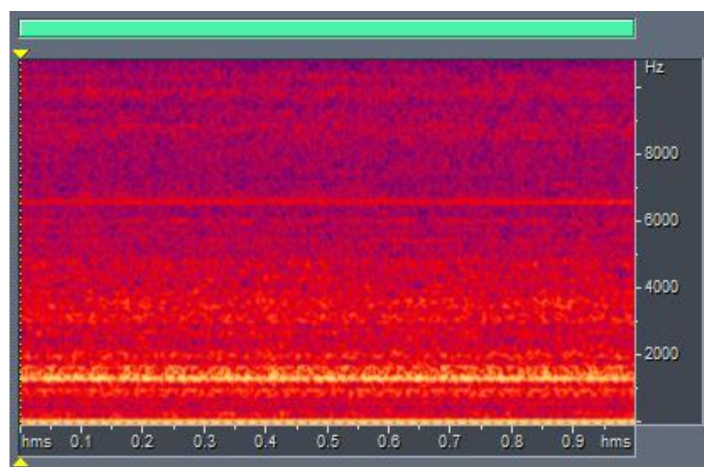

Рис. 5. Экспериментально полученный спектральный вид звуковой волны (сегмент равен 1 сек)

К низкочастотному диапазону следует отнести колебания установочных элементов и приводов подачи, к средним и высоким — частоту инструмента, шпинделя и др. В данной работе с точки зрения акустической диагностики определены оптимальные режимы резания, поддерживающие устойчивую работу технологической системы.

Предварительно определили частоту, соответствующую частоте резания (рис. 6). Применили фильтрацию к звуковым колебаниям при:

– перемещении шпиндельного узла (Y, Z),

– вращении (n),
– перемещении стола (X),
– шуме в лаборатории.

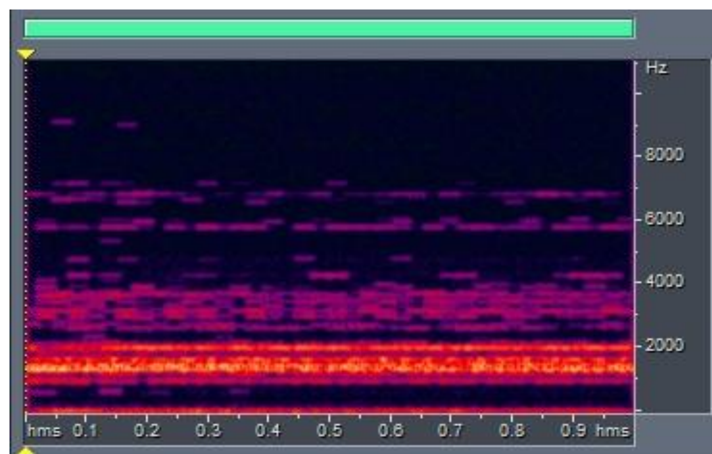

Рис. 6. Спектральный вид звуковой волны после фильтрации (сегмент равен 1 сек)

Стоит отметить некоторый разброс значений (рис. 6), связанный с огромным количеством факторов, которые сложно исключить при проведении натурного эксперимента.

Середина выраженного диапазона частот, представленных на рис. 5, соответствует вращению 1500 об/мин с наклоном инструмента 40°. Акустическая диагностика подтвердила, что резание шло практически непрерывно, т. е. без ударных «пульсирующих» нагрузок. Последняя ситуация представлена на рис. 7. Здесь выделенное время оценки составляет 0,5 с, количество периодов — 25.

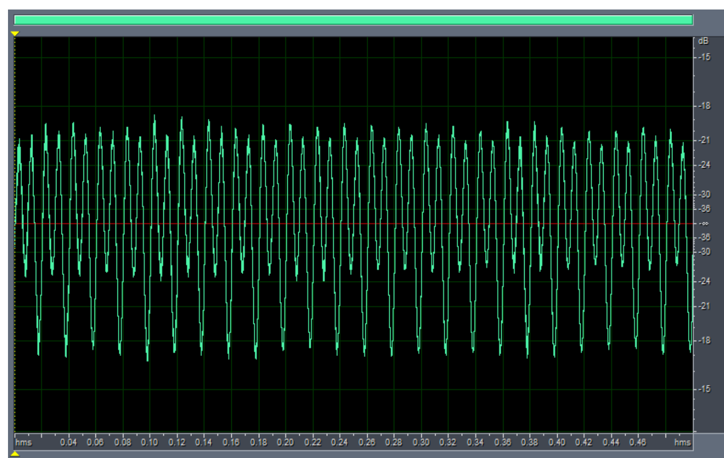

Рис. 7. Фильтрованный фрагмент звуковой волны, которая основана на звуке резания при γ = 40° (сегмент равен 1/2 сек)

На рис. 7 представлена неоднозначно интерпретируемая звуковая волна. Однако ее довольно просто охарактеризовать, если углубиться в сущность механической обработки фрезерованием. При попутном фрезеровании и скруглении режущей кромки пластические деформации металла с остаточными напряжениями остаются на обработанной поверхности. Даже при должной подаче СОЖ в поверхностных слоях материала возникают температурные деформации и искажают кристаллическую решетку (остаточные напряжения III рода). Наряду с этим после удаления инструмента растянутые верхние слои металла приобретают остаточные напряжения сжатия. Если описывать механообработку со стороны кинематики процесса, стоит отметить фактор снятия стружки, а именно величину Θ_2 — угол резания материала с наклоненным шпинделем в попутном направлении (рис. 8).

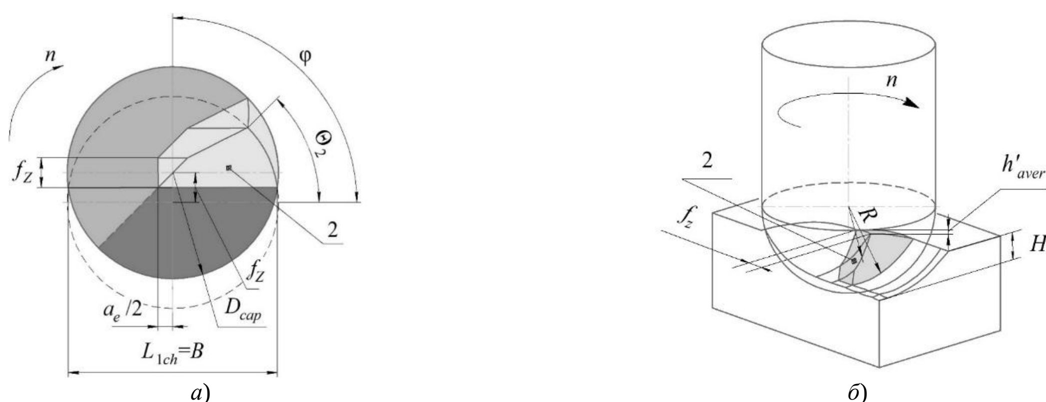

Рис. 8. Срезаемый при механообработке сегмент 2: *а* — вид сверху; *б* — проекция срезаемого сегмента [16]

Уточним, что инструмент режет в зоне 2. Полученные данные подтверждаются результатами моделирования, но рассмотрены для идеального случая.

Наряду с указанными факторами теоретические и эмпирические расхождения часто вызваны вибрациями, связанными с отклонением и износом инструмента, а также с геометрией зоны резания. На рис. 7 прослеживается процесс подрезания материала заготовки *j*-м зубом инструмента, который наряду с другими факторами определяет столь интересную форму полученной волны.

В дополнение к вышесказанному на рис. 9 представлены зависимости, которые показывают, что при уменьшении амплитуды вибраций увеличивается угол наклона от 10° до 40°.

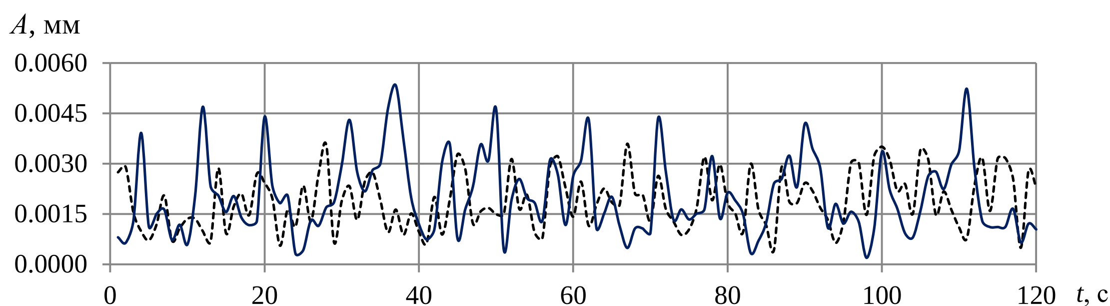

Рис. 9. Амплитуды колебаний в зависимости от угла наклона поверхности: сплошная линия — 10°, пунктирная — 40°

М. Р. Гимадеев и В. В. Гусляков[4] проанализировали международную практику профильной оценки шероховатости поверхности. Авторы работы [32] выдвинули предложения по переходу на трехмерную оценку. В представленном исследовании для составления комплексной оценки измерения шероховатости проводились в ортогональной системе координат.

Анализ полученных профилограмм (рис. 10) позволяет сделать заключение о регулярности микрорельефа поверхности после обработки сфероцилиндрической концевой фрезой. При этом нецелесообразно учитывать шероховатость инструмента, так как ее проявления незначительны. Некоторое дополнительное увеличение шероховатости наблюдается в направлении бокового шага a_e, что подтверждает увеличение упругих отжатий инструмента. Об этом свидетельствуют представленные профилограммы, где периоды профиля (расстояние впадин и выступов) соответствуют заданной величине подачи fz = 0,2 мм/зуб.

[4] Гимадеев М. Р. Анализ зарубежного опыта при фрезеровании сфероцилиндрическим инструментом // Информационные технологии XXI века. Хабаровск, 2019. С. 330–334.

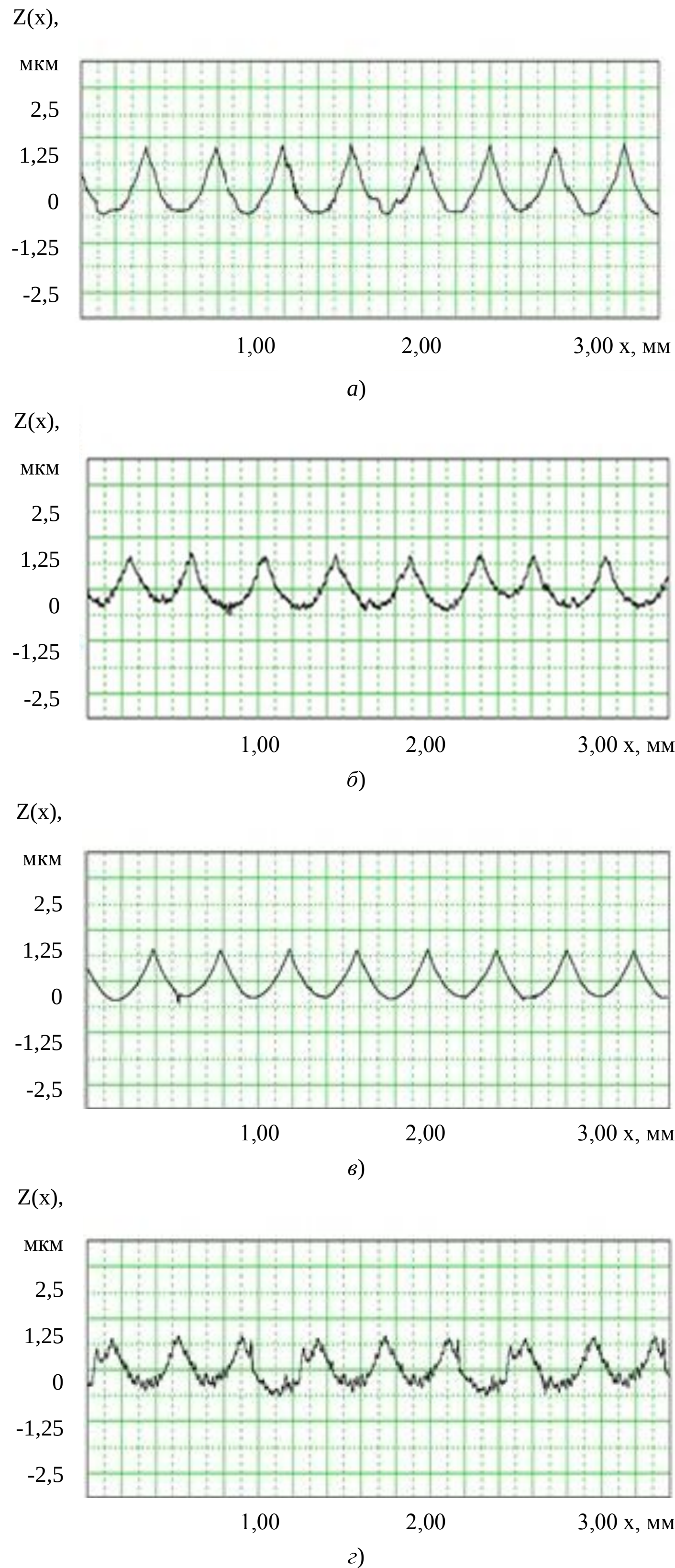

Рис. 10. Профилограммы поверхностей после фрезерования с различными углами наклона: *а* — γ: γ = 10°, направление f_z; *б* — γ = 10°, направление a_e; *в* — γ = 40°, направление f_z; *г* — γ = 40°, направление a_e

Фотомикроскопические изображения обработанной поверхности имеют очевидную гексагональную форму (рис. 11). Качество обработанной поверхности в направлении бокового шага a_e может снижаться из-за отжатия режущего инструмента и возрастания амплитуды колебаний технологической системы при фрезеровании. Это подтверждают результаты виброакустической диагностики.

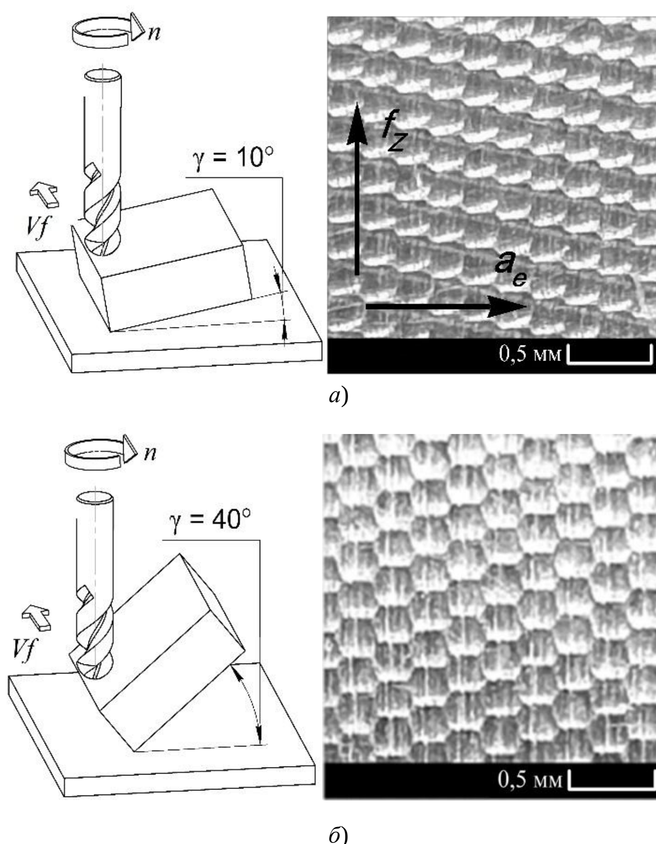

Рис. 11. Схема фрезерования и фото обработанной поверхности при: *а* — γ = 10; *б* — γ = 40

Еще раз подчеркнем, что результаты экспериментов соотносятся с данными, полученными многими авторами, и согласуются с теориями упругости, формообразования, резания материалов и технологией машиностроения.

Обсуждение и заключения. Изучено влияние угла наклона обрабатываемой поверхности на силы резания, вибрации и параметры микрорельефа. Создана модель силы резания и вибрации, включающая кинематико-геометрические параметры. Исследование показало, что количественно и качественно силы резания и колебания режущего инструмента зависят от угла наклона поверхности.

Анализ экспериментальных данных позволил выявить при увеличении угла наклона до 30–40° тенденцию к снижению амплитудных параметров шероховатости на 10–20 %. Качество обработанной поверхности снижается из-за упругого отжатия сфероцилиндрического инструмента и возрастания амплитуды колебаний технологической системы.

Установлено, что силы растут в направлении $a_e(X)$ и $fz(Y)$ при γ > 40°. Это можно объяснить распределением составляющих силы резания вдоль режущей кромки, которое зависит от наклона поверхности.

Полученные авторами решения задач мониторинга и анализа параметров шероховатости за счет акустической диагностики позволяют существенно сократить объем экспериментальных исследований. Такой подход дает возможность значительно снизить затраты материальных ресурсов и времени на механическую обработку изделий. Результаты экспериментов представляют практический интерес и уточняют сведения о формировании микрорельефа, в том числе о параметрах шероховатости при механической обработке резанием. Необходима более детальная проработка предложенного метода акустической диагностики.

Список литературы

1. Vijiakumar. S. Jatti. Machine learning based predictive modeling of ball nose end milling using exogeneous autoregressive moving average approach / Vijiakumar S. Jatti, Ravi Sekhar, Pritesh Shah // In: Proc. 2021 12th IEEE Int. Conf. on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). — 2021. — P. 68–72. https://doi.org/10.1109/ICMIMT52186.2021.9476067

2. Zhou Lingli. Research and development of fungus shaped blade root CAM software based on VB / Zhou Lingli, Liu Guoqing, Xiong Xiaocong // In: Proc. 2021 4th IEEE Int. Conf. on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (PRAI). — 2021. — P. 291–295. https://doi.org/10.1109/PRAI53619.2021.9551076

3. Koichi Akazawa. Study on regenerative chatter vibration in ball end milling of flexible workpieces / Koichi Akazawa, Eiji Shamoto // In: Proc. 2008 IEEE Int. Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science. — 2008. — P. 1–6. https://doi.org/10.1109/MHS.2008.4752412

4. Xiurong Zhu. Process analysis and parameter optimization of five axis NC machine for machining complex curved surface impellers / Xiurong Zhu, Yeu Wang // In: Proc. 2019 IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). — 2019. — P. 122–124. https://doi.org/10.1109/ICITBS.2019.00036

5. Salami, R. Feed rate optimization for 3-axis ball-end milling of sculptured surfaces / R. Salami, M. H. Sadeghi, B. Motakef // International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2007. — Vol. 47. — P. 760–767. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.011

6. The simulation of cutting force of free-form surface machining with ball-end milling cutter / Lei Shi, En Fu Liu, Yi Zhang [et al.] // In: Proc. 2009 IEEE Int. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management. — 2009. — P. 2314–2318. https://doi.org/10.1109/IEEM.2009.5373028

7. Altintas, Y. Mechanics and dynamics of ball end milling / Y. Altintas, P. Lee // Journal of Manufacturing Science and Engineering. — 1998. — Vol. 120. — P. 684–692. https://doi.org/10.1115/1.2830207

8. Influence of vibration amplitude on tool wear during ball end milling of hardened steel / A. V. Anstev, Ngon Dang Thien, Trong Dang Huu, E. S. Yanov // In: Proc. 2018 4th IEEE Int. Conf. on Green Technology and Sustainable Development (GTSD). — 2018. — P. 232–236. https://doi.org/10.1109/GTSD.2018.8595567

9. Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces / Yueping Chen, Jian Gao, Haixiang Deng [et al.] // Precision Engineering. — 2013. — Vol. 37. — P. 203–212. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.08.003

10. Vila, C. Study of different cutting strategies for sustainable machining of hardened steels / C. Vila, J. V. Abellán-Nebot, H. R. Siller-Carrillo // Procedia Engineering. — 2015. — Vol. 132. — P. 1120–1127. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.604

11. Thakre, A. A. Optimization of milling parameters for minimizing surface roughness using Taguchi's Approach / Avinash A. Thakre // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. — 2013. — Vol. 3. — P. 226–230.

12. Amal, T. S. Machining parameters optimization in end milling of Ti6Al4V using Taguchi method / T. S. Amal, V. Vidya, A. K. Abraham // International Journal of Research in Engineering and Technology. — 2015. — Vol. 3. — P. 31–40.

13. Optimization of milling parameters of EN8 using Taguchi methodology / R. Ashok Raj, T. Parun, K. Sivaraj, T. T. M. Kannan // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. — 2013. — Vol. 2. — P. 202–208.

14. Study of the milling strategy on the tool life and the surface quality for knee prostheses / M. Boujelbene, P. Abellard, E. Bayraktar, S. Torbaty // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2008. — Vol. 31. — P. 610–615.

15. Choubey, A. Optimization of process parameters of CNC milling machine for mild steel using Taguchi design and Single to Noise ratio Analysis / A. Choubey, V. Chaturvedi, J. Vimal // International Journal of Engineering Research and Technology. — 2012. — Vol. 1. — P. 1–12.

16. Gimadeev, M. R. Cutting Forces and Roughness During Ball End Milling of Inclined Surfaces / M. R. Gimadeev, V. A. Stelmakov, V. V. Gusliakov // In: Proc. the 6th International Conference on Industrial Engineering — 2021. — Vol. II. — P. 926–937. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_107

17. Predictive force model for ball-end milling and experimental validation with a wavelike form machining test / M. Fontaine, A. Devillez, A. Moufki, D. Dudzinski // International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2006. — Vol. 46. — P. 367–380. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.011

18. Cutting force estimation in sculptured surface milling / A. Lamikiz, L. N. López de Lacalle, J. A. Sánchez, M. A. Salgado // International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2004. — Vol. 44. — P. 1511–1526. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.05.004

19. Altintaş, Y. A general mechanics and dynamics model for helical end mills / Y. Altintaş, P. Lee // CIRP Annals. — 1996. — Vol. 45. — P. 59–64. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63017-0

20. Bouzakis, K. D. Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools / K. D. Bouzakis, P. Aichouh, K. Efstathiou / International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2003. — Vol. 43. — P. 499–514. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00265-1

21. Радзевич, С. П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / С. П. Ралзевич. — Киев : Растан, 2001. — 592 с.

22. Гимадеев, М. Р. Обеспечение качества поверхности при механообработке сложнопрофильных деталей / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // Технология машиностроения. — 2018. — № 11. — С. 9–16.

23. Toh, C. K. A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling / C. K. Toh // Journal of Materials Processing Technology. — 2004. — Vol. 152. — P. 346–356. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.382

24. Cutting force prediction for ball nose milling of inclined surface / K. V. R. Subrahmanyam, Wong Yoke San, Geok-Soon Hong, Huang Sheng // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2010. — Vol. 48. — P. 23–32. https://doi.org/10.1007/s00170-009-2275-5

25. Modeling of cutter displacements during ball end milling of inclined surfaces / S. Wojciechowski, T. Chwalczuk, P. Twardowski, G. M. Krolczyk // Archives of Civil and Mechanical Engineering. — 2015. — Vol. 15. — P. 798–805. https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.06.008

26. Пономарев, Б. Б. Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании / Б. Б. Пономарев, Ши Хьен Нгуен // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2019. — № 3 (708). — С. 11–20. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-3-11-20

27. Пономарев, Б. Б. Моделирование и анализ влияния условий обработки на силы резания при концевом фрезеровании / Б. Б. Пономарев, Ш. Х. Нгуен // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2018. — Т. 59, № 3. — С. 8–16. https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.3(59).8-16

28. Гимадеев, М. Р. Корреляционные связи показателей шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // Тяжелое машиностроение. — 2018. — № 9. — С. 24–29.

29. Формирование параметров шероховатости на основе корреляционных связей при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей / В. М. Давыдов, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, А. В. Сарыгин // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2019. — Т. 15, № 6 (174). — С. 243–248.

30. Пономарев, Б. Б. Выбор оптимальных параметров стратегии фрезерования поверхностей сложной формы / Б. Б. Пономарев, Д. Б. Пайкин // Вестник ИрГТУ. — 2010. — № 6 (46). — С. 52–56.

31. Аршанский, М. М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. — Москва : Машиностроение, 1983. — 136 с.

32. Анализ международной практики профильной и трехмерной оценки шероховатости поверхности / В. М. Давыдов, В. В. Заев, П. Н. Паночевный [и др.] // Ученые заметки ТОГУ. — 2013. — Т. 4, № 4. — С. 1061–1074.

Поступила в редакцию 25.04.2022
Поступила после рецензирования 05.05.2022
Принята к публикации 11.05.2022

Об авторах:

Гимадеев Михаил Радикович, доцент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, 009063@pnu.edu.ru.

Ли Андрей Александрович, ассистент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136), ORCID, 011864@pnu.edu.ru.

Заявленный вклад соавторов:

М. Р. Гимадеев — постановка целей и задач исследования, формулирование основной концепции, методическое описание уравнений, анализ результатов исследований, подготовка текста, корректировка выводов. А. А. Ли — планирование эксперимента, решение задач исследования, проведение эксперимента и расчетов, доработка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.